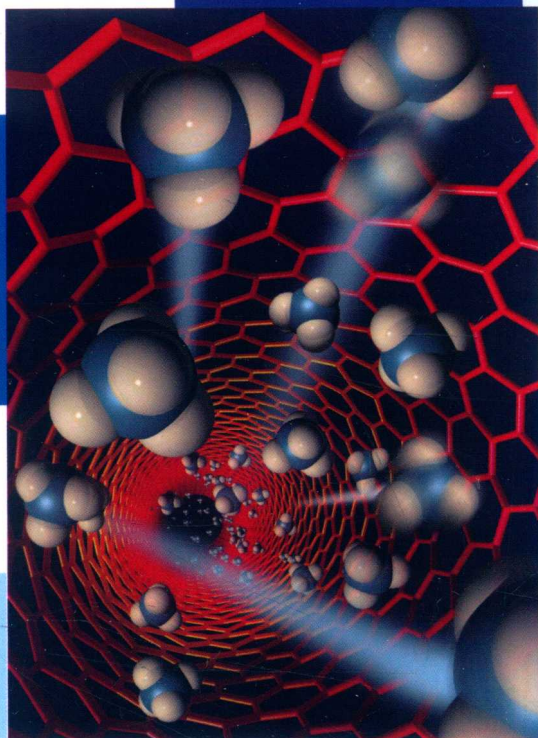




基于微纳米工艺技术的 新型光纤模式干涉器件原理与应用

罗海梅 李新碗 著



科学出版社

江西师范大学博士文库专项资助成果

基于微纳米工艺技术的 新型光纤模式干涉器件原理与应用

罗海梅 李新碗 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述了基于微纳米结构和尺度的新型光纤模式干涉器件的原理、建模、制备和特性,包括具有微纳米厚液晶涂敷层的长周期光纤光栅和局部弯曲的微纳米光纤模式干涉仪。应用四层模型分析了具有高折射率微纳米涂敷层的长周期光纤光栅中的模式迁移效应和调谐特性,采用刷涂工艺在 LPFG 表面制备了不同厚度的液晶涂敷层,利用模式迁移效应在实验上实现了 LPFG 的大范围热光/电光调谐;用阶梯近似法和直波导等效法分析了具有弯曲结构的锥形微纳米光纤的传输特性,理论研究并实验验证了基于此类结构的模式干涉仪传输谱的温度不敏感条件,实现了高灵敏度折射率传感和微位移传感。

本书可供从事光纤器件和光纤传感技术方面工作的科技人员和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关领域的教师、高年级本科生和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于微纳米工艺技术的新型光纤模式干涉器件原理与应用/罗海梅, 李新碗著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-03-052238-2

I. ①基… II. ①罗… ②李… III. ①光纤器件-纳米技术-研究
IV. ①TN253

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 054910 号

责任编辑: 周 涵 崔慧娴/责任校对: 张凤琴
责任印制: 张 伟/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 9

字数: 98 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

微型化与集成化是近年来先进光子技术和器件的重要发展方向,微纳米工艺技术是实现光子器件微型化与集成化的基础。借助微纳米工艺技术,人们可以按照需求来设计制备具有优异性能的光纤微纳米结构和器件。同时,理论和实验的研究表明,随着功能结构尺度的减小,光纤器件的特性及性能等都表现出与传统宏观结构器件显著不同的特点。这些特异的物理性质具有广阔的实际应用和理论研究前景。

本书基于上述研究背景,从理论和实验上分析了两种具有代表性的基于微纳米尺度结构的新型光纤模间干涉器件,包括其模式与耦合特性以及相关微纳米工艺技术,详细研究和探讨了它们的工作原理、制备过程以及功能特性,同时通过与同类传统尺寸结构光纤器件的比较验证了基于微纳米技术的光纤模间干涉器件在性能上的优越性。本书的主要内容如下:

(1)介绍了两种颇具代表性的模间干涉型光纤器件及其相关微纳米加工工艺。一种具有代表性的模间干涉器件是光纤光栅,通过光纤表面和表层微纳米薄膜涂层工艺,可实现具有大范围可调谐特性的光纤光栅器件;另一种具有代表性的模间干涉器件是锥形光纤,通过微纳米光纤制备工艺,可以获得具有高灵敏度传感特性的锥形微纳米光纤器件。

(2)采用四层光纤模型理论分析了覆盖高折射率微纳米涂敷层的长周期光纤光栅的包层模特性,并通过耦合模理论对四层模型长周期光纤

光栅谐振波长和频谱特性进行了分析;研究了谐振峰波长与涂敷层相关参数的关系,并分析了内包层厚度在提高长周期光纤光栅调谐范围方面的作用。

(3)从理论上深入分析了具有弯曲结构的锥形微纳米光纤中的模式耦合及干涉特性,建立了局部弯曲的锥形微纳米光纤的数学模型,为理论分析提供了所需的数学依据;并利用 Matlab 仿真工具采用数值分析法对不同弯曲半径下锥形微纳米光纤中的模式耦合进行了分析;详细阐述了基于局部弯曲的锥形微纳米光纤的模间干涉仪的工作原理,分析了弯曲锥形微纳米光纤的几何参数对输出干涉波形的影响,并给出了参数优化的原则。

(4)从实验上研究了覆盖微纳米液晶涂敷层的长周期光纤光栅的制备过程和大范围调谐特性。利用基于菲涅耳反射的折射率测量方法,对不同温度下的液晶折射率进行了测量和分析;采用简单的刷涂工艺在长周期光纤光栅表面制备了不同厚度的液晶涂敷层;通过实验研究了该光纤器件的热光特性和电光特性,并将仿真计算的结果与实验结果进行了比较。研究表明,覆盖约 800nm 厚度的液晶涂敷层的长周期光纤光栅在 58~60℃ 的温度范围内会出现模式迁移现象,在此区域内,该光纤器件对温度具有非常高的响应灵敏度,并且利用这一特性,设计并实现了在特定温度下的长周期光纤光栅的大范围电光调谐,最大调谐范围达到约 10nm。

(5)从实验上详细研究了基于局部弯曲的锥形微纳米光纤模间干涉仪的制备工艺和传感特性。利用实验室自制的微纳米光纤拉伸系统制备了具有不同锥长和束腰直径的微纳米光纤,并将其弯曲成一近似对称

的 C 形弯曲结构形成模间干涉仪;详细研究了它们的温度特性以及折射率和微位移传感特性。理论和实验的研究表明,当弯曲的锥形光纤的束腰直径约为 $1.92\mu\text{m}$ 时,该模间干涉仪的传输谱基本不受环境温度的影响。该光纤器件的环境折射率传感灵敏度和微位移传感灵敏度分别为 $658\text{nm}/\text{RIU}$ (refractive index unit)和 $102\text{pm}/\mu\text{m}$ 。该器件可用于高灵敏度传感。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目“基于磁流体和单模-锥形多模-单模光纤的高灵敏度无热化全光纤电流传感器”(项目编号:51567011)、江西省科技厅对外合作基金项目“面向复杂应用环境的热稳定型磁控可调光纤梳状滤波器研制”(项目编号:20151BDH80060)的资助以及江西省科技厅科技支撑计划项目“面向食品安全检测的高灵敏度光纤生物传感器关键技术研究”(项目编号:20151BBG70062)的支持,在此表示感谢。在本书的写作过程中,上海交通大学的陈建平教授、邹卫文教授和周林杰教授给予了热情的指导和帮助,在此一并表示诚挚的谢意!由于时间仓促,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

著 者

2016 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 典型光纤模间干涉器件的研究现状与发展趋势	3
1.2.1 典型光纤模间干涉器件一:光纤光栅	3
1.2.2 典型光纤模间干涉器件二:锥形光纤	5
1.3 实现新型光纤模间干涉器件的微纳米工艺技术	8
1.3.1 光纤表面和表层微纳米薄膜工艺	8
1.3.2 微纳米光纤的加工工艺	12
1.4 本书的研究思路与主要研究内容	15
1.4.1 研究思路	15
1.4.2 本书结构安排	16
参考文献	18
第 2 章 覆盖微纳米高折射率涂敷层的长周期光纤光栅的理论 分析与模拟计算	25
2.1 四层模型 LPFG 的模式耦合	25
2.1.1 各包层模的有效折射率和传输常数	26
2.1.2 耦合系数和耦合常数	27
2.1.3 四层模型 LPFG 的模式耦合方程	28
2.1.4 谐振条件	30

2.2	四层模型 LPFG 的数值计算和模拟分析	30
2.2.1	四层模型 LPFG 的透射谱的模拟计算方法 ..	30
2.2.2	高折射率微纳米涂敷层对 LPFG 模场分布的影响	32
2.2.3	不同微纳米涂敷层折射率下的 LPFG 的频谱和大范围波长调谐	36
2.2.4	LPFG 的包层半径对谐振峰漂移量的影响 ..	37
2.3	本章小结	38
	参考文献	39
第 3 章	具有弯曲结构的锥形微纳米光纤的理论分析与模拟计算 ..	41
3.1	锥形微纳米光纤的结构模型	42
3.2	直锥形微纳米光纤的传输特性	44
3.2.1	束腰区微纳米光纤的基本特性	45
3.2.2	直锥形过渡区域的基本理论	50
3.2.3	直锥形微纳米光纤传输谱的模拟计算	54
3.3	弯曲的锥形微纳米光纤的传输特性	55
3.3.1	弯曲的锥形过渡区域的绝热条件与非绝热条件	55
3.3.2	非绝热弯曲的锥形过渡区域的模式耦合分析	56
3.3.3	非绝热弯曲锥形微纳米光纤的传输谱的模拟计算	62
3.4	本章小结	64

参考文献	65
第 4 章 覆盖微纳米液晶涂覆层的长周期光纤光栅特性的实验研究	67
4.1 液晶材料简介及其折射率测量	68
4.1.1 液晶的特点及分类	68
4.1.2 液晶折射率的测量原理	71
4.1.3 不同温度下液晶折射率的测量方法	72
4.1.4 不同温度下液晶折射率的实验测量结果	76
4.2 覆盖微纳米液晶涂覆层的 LPFG 器件的制备	77
4.2.1 器件结构参数优化计算	77
4.2.2 器件制备	79
4.3 覆盖微纳米液晶涂覆层的 LPFG 器件的调谐特性研究	81
4.3.1 热光调谐特性	81
4.3.2 电光调谐特性	86
4.3.3 特定温度下的大范围电光调谐特性	88
4.4 本章小结	91
参考文献	92
第 5 章 基于弯曲结构锥形微纳米光纤的模间干涉仪特性的实验研究	94
5.1 微纳米光纤拉伸系统及工艺简介	94
5.2 微纳米光纤独特的物理特性	98
5.3 基于弯曲结构的锥形微纳米光纤模间干涉仪的	

制备及传输谱特性	100
5.4 基于弯曲结构的锥形微纳米光纤模间干涉仪的 传感特性研究	105
5.4.1 高灵敏度折射率传感特性	105
5.4.2 温度特性	110
5.4.3 微位移传感特性	115
5.5 本章小结	125
参考文献	125
第6章 结束语	128
6.1 本书主要工作	128
6.1.1 覆盖高折射率微纳米涂敷层的 LPFG 的 理论分析与实验研究	128
6.1.2 具有弯曲结构的锥形微纳米光纤的理论 分析与实验研究	129
6.2 研究主要创新点	130
6.3 工作展望	131

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

在光通信、光传感与光信号处理等领域,随着微纳米工艺技术的发展与成熟,各种微纳米光子器件应运而生。这些微纳米光子器件因具有体积小、集成度高以及性能好等优点越来越受到人们的青睐^[1-3]。微型化和集成化已成为当今科技发展和器件开发的主要研究方向之一^[4]。集成光子器件可以代替传统器件应用于光通信、光存储、信号处理、传感等系统,是实现未来集成光子芯片的基础。目前,大部分无源光器件与有源光器件都可以在集成光子芯片上实现,包括滤波器、电控或光控交换网络、光源、调制器、光电检测器等。在光纤通信的发展道路上,可集成光子器件的兴起有着巨大的意义,成为光纤器件发展的一个重要方向^[5]。

基于模间干涉(modal interference, MI)的光纤器件,因具有结构紧凑、插入损耗低、制作工艺简单和成本低等特点受到国内外研究者的广泛重视^[6-11],与传统的光纤器件相比,模间干涉型光纤器件更容易实现与光通信、光纤传感等系统的集成,且适合于密集波分复用(DWDM)通信系统,其应用前景非常广阔。

光纤模间干涉器件的工作原理就是光纤内传输的各模式之间的相

互干涉^[6]。从几何光学的观点来分析,各种不同模式的光是由于光在进入光纤时的入射角不同而造成的。这些不同模式的光在相同长度的光纤中传播时,由于其传播的速度不一样,会产生不同的光程差,因而引起模式之间的干涉效应。目前,在单模光纤中,实现模间干涉的方法主要包括光纤光栅技术^[12]、光纤纤芯的不对准熔接^[13,14]、光纤纤芯模场的不匹配熔接^[15]和光纤熔融拉锥技术^[16,17]等。

随着对光纤模间干涉技术的广泛研究,各种基于模间干涉的光纤器件越来越多地涌现出来,其应用领域也日益广泛。在光纤传感应用领域,光纤模间干涉器件的干涉光谱随外界参量的改变而发生变化,通过探测这些变化,可以测量如温度^[18-25]、应变^[19,25-29]、位移^[30-32]、液体折射率^[33-35]、液体浓度以及 pH^[36]等参量的变化;在光纤激光系统应用领域,光纤模间干涉器件可以被用来制作光纤激光器^[37,38]、光纤滤波器^[39]和带通滤波器^[40,41]等;在通信领域,光纤模间干涉器件主要应用在 WDM 方面^[39,42]。

近年来,作为当今高技术发展的重要领域之一的微纳米工艺技术高速发展为具有微纳米尺度和结构的新型光纤器件的研究和实现提供了条件。微纳米工艺技术是实现功能结构、器件以及系统微纳米化的基础^[43]。当材料或结构的尺寸进入微纳米尺度时,其表现出许多与宏观尺度下不同的物理及光学特性,基于这些新特征,研究者研制开发出了多种新型微纳光子学器件。因此,利用微纳米工艺技术设计并实现结构紧凑且性能优良的新型光纤模间干涉器件,同时探索这些新型光纤器件独特的物理性质和器件功能及其可能的应用领域,成为今后一个值得研究的课题。

1.2 典型光纤模间干涉器件的研究现状与发展趋势

模间干涉可以是普通光纤中基模与高阶模之间的干涉,也可以由保偏光纤中的两个偏振模式之间形成^[6]。本书讨论前一种形式的模间干涉。

理想情况下普通的单模光纤只能传输单个模式,但有时为了获得某些特殊用途的光纤器件,往往人为制造结构上的扰动,使光纤中出现多个模式的耦合与干涉,比如我们常见的光纤光栅和锥形光纤。

1.2.1 典型光纤模间干涉器件一:光纤光栅

自 20 世纪 80 年代以来,研究人员对光纤光栅的工作原理、光谱性质和应用领域等方面进行了深入的研究。根据不同的分类方法可将光纤光栅分为如下几类^[12]:

(1)按光栅周期进行分类可分为:光纤布拉格光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)^[12]。通常情况下,周长小于 $1\mu\text{m}$ 的光栅可称为 FBG;而周期在几十到几百微米之间的称为 LPFG。FBG 的原理为传输方向相反的模式间耦合;LPFG 的原理为纤芯基模和包层模之间的耦合^[12]。

(2)按光纤的材料进行分类可分为:在普通石英光纤上写入光栅^[12],在塑料光纤^[44]以及光子晶体光纤^[45]中写入光栅等。

(3)按光栅的轴向折射率分布可分为:均匀光纤光栅、啁啾光纤光栅和高斯变迹光栅等^[12]。均匀光纤光栅的光栅周期及折射率调制大小都为常数;啁啾光纤光栅的光栅周期大小是沿着轴向逐渐变化的;高斯变

迹光栅的折射率沿轴向的折射率变化为高斯函数^[12]。

(4)按光栅形成的机理可分为:利用掺锗光纤的光敏特性形成的光纤光栅;利用弹光效应形成的光栅^[12]。

作为一种传输型带阻滤波器件,LPFG 的谐振波长有多种调谐方式,主要包括:

(1)机械调谐:利用光纤光栅的谐振波长对应力的敏感性,可以采用不同的应力方式来实现波长调谐功能,这些应力方式包括横向应力、纵向应力和扭转应力等^[12]。

(2)热光调谐:由于材料折射率会随温度的变化发生改变,基于这一特性,可以在光纤光栅表面涂上一层热光材料或镀膜来实现波长调谐^[46]。

(3)电光调谐:基于电光材料的折射率随电场变化发生改变的特点,在光纤光栅表层涂上电光材料来实现波长调谐^[47]。

(4)磁光调谐:磁性材料具有折射率随磁场改变而变化的特点,利用这一特性,在光纤光栅的表面覆盖磁性材料可以实现波长调谐^[48]。

基于 LPFG 的应用大多是利用其对环境或包层折射率的感应特性,因此如何改善其结构从而提高其对环境或包层折射率的感应灵敏度,成为新型光栅器件研究的主要发展方向之一。

近年来,人们提出了一些新的 LPFG 结构^[49-51],主要有以下几类:

(1)利用腐蚀法减小 LPFG 的包层厚度^[49]。

通过减小 LPFG 的包层厚度,进而提高 LPFG 对环境或包层折射率变化的灵敏度。

(2)利用微纳米薄膜工艺在 LPFG 表面镀一层微纳米厚度的高折射

率层^[50]。

在 LPFG 的表面引入一高折射率层后,当环境的折射率发生改变时,LPFG 中的包层模会出现模式迁移现象,在模式迁移区域内,LPFG 对环境折射率变化的响应灵敏度大大增加。

(3)在 LPFG 表层覆盖一层微纳米高折射率层,同时减小 LPFG 包层的厚度^[51]。

同时利用上述两种方法,更大可能地提高 LPFG 对环境折射率变化的响应灵敏度。

1.2.2 典型光纤模间干涉器件二:锥形光纤

锥形光纤可以通过熔融拉锥的方法来制备。根据腰区直径与锥形过渡区的比值,可将锥形光纤分为突变锥和缓变锥^[52]。突变锥的锥形过渡区域比较陡峭,而缓变锥的锥形过渡区域较为平缓。光纤引入锥区后,光纤中传输的模式会发生相应的变化,不同模式间出现耦合干涉,利用这一特性,可以制作多种光器件^[52]。

(1)Michelson 干涉仪:锥形光纤 Michelson 干涉仪的制作方法是在一根标准单模光纤上制作一个突变锥,并在光纤尾端镀金作反射镜,如图 1-1 所示^[34]。其反射光谱为干涉谱,该结构可用于液体折射率传感,灵敏度大约为 29nm/RIU。

(2)Mach-Zehnder 干涉仪:锥形光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的制作方法是在一根单模光纤上用熔拉法形成一个 S 形的突变锥,如图 1-2 所示^[53]。这种干涉仪结构可以应用于折射率传感和应力传感,其传感灵敏度最高分别为 1590nm/RIU 和 60pm/microstrain。

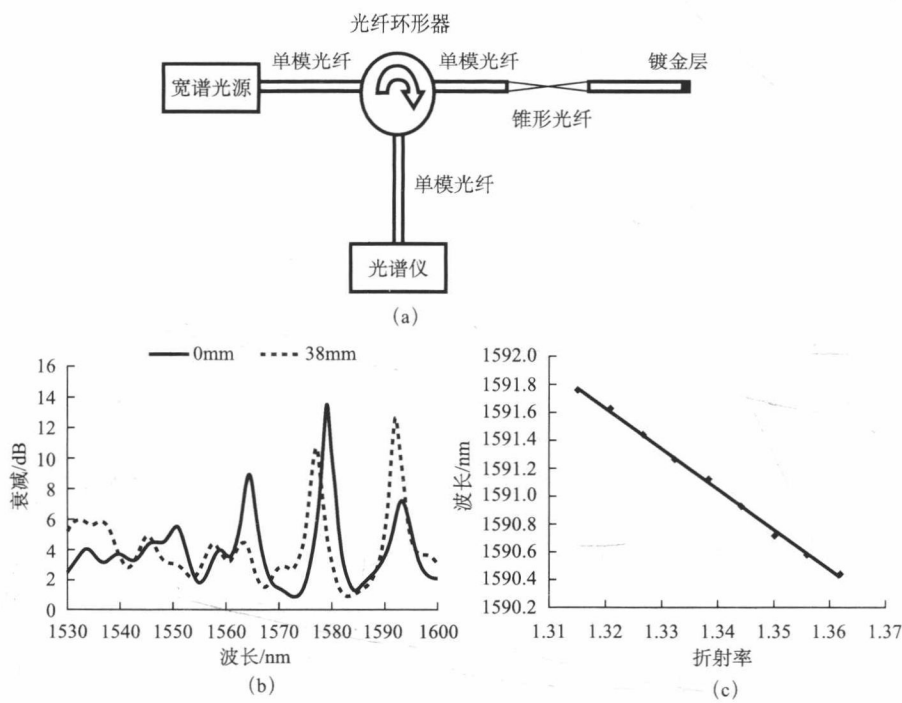


图 1-1 单根单模光纤构成的 Michelson 干涉仪用作液体折射率传感^[33]

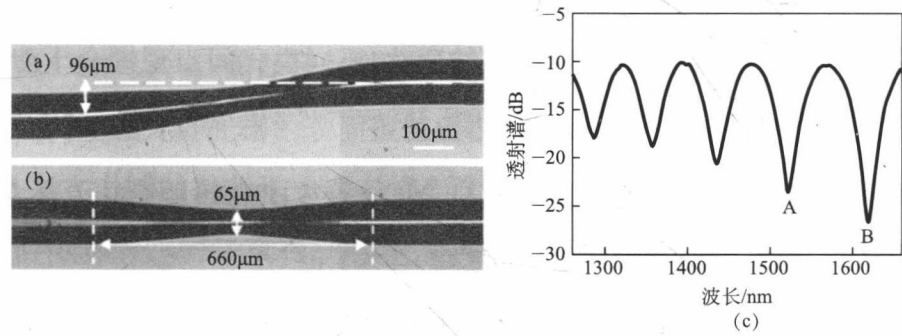
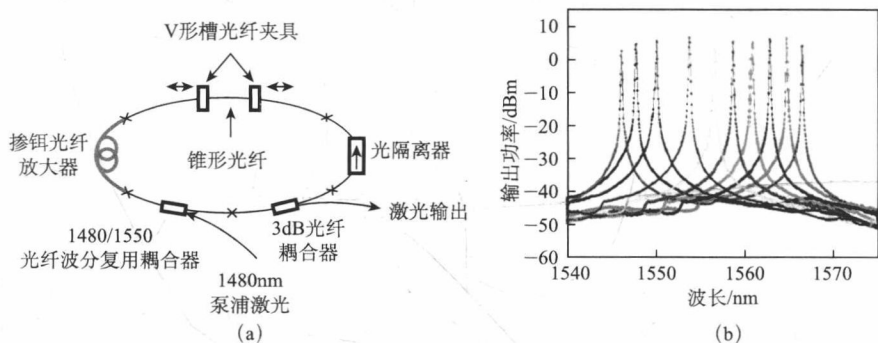
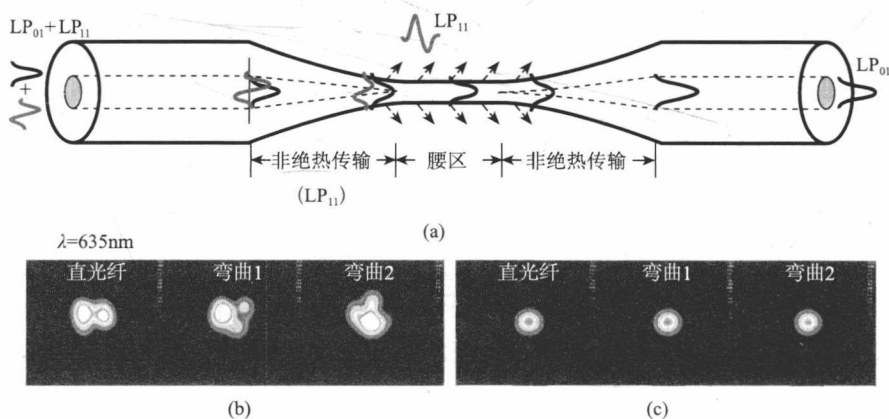


图 1-2 单光纤 S 形突变锥 Mach-Zehnder 干涉仪^[53]

(3)窄线宽可调滤波器:锥形光纤窄线宽可调滤波器的实现方法是在掺铒环形光纤激光器(图 1-3)上连接一个含有缓锥区的锥形光纤,以锥区长度的变化来实现 20nm 的连续调谐^[54]。

图 1-3 可调掺铒环形光纤激光器^[54]

(4)模式滤波器:锥形光纤模式滤波器的制作方法是在单模光纤上拉制一个锥形区(图 1-4),将高阶模式滤除,实现稳定的光纤单模化操作^[55]。经过这种光纤模式滤波器的激光非常稳定,即使光纤发生弯曲,其输出的光斑也可以保持原样^[55]。

图 1-4 锥形光纤模式滤波器^[55]

(a)锥形光纤对光波模式的影响;(b)拉锥前;(c)拉锥后

上述研究表明,锥形光纤在光纤传感和光纤激光器中都有着良好的特性^[52]。

近年来,通过高温物理拉伸的工艺方法获得的具有低损耗、强倏逝场以及色散参量可调等优点的锥形微纳米光纤及其相关器件成为国内